

Jaakko Huuromonen

BIOKAASUREAKTORIN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

BIOKAASUREAKTORIN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Jaakko Huuonen
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Talotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Koulutusohjelma, Suuntautumisvaihtoehto

Tekijä(t): Jaakko Huuonen

Opinnäytetyön nimi: Biokaasureaktorin lämmitysjärjestelmän suunnittelu

Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi- ja vuosi: 4/2015

Sivumäärä: sivut + liitteet
(esim. 28 + 1)

Työn tilaaja on Bio JJJJ Oy ja opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella lämmitysjärjestelmä yrityksen kehitteillä olevaan uudentyyppiseen Lerkka-biokaasulaitokseen. Biokaasu on uusiutuva energian lähde, jonka käyttö yleistyy koko ajan fossiilisten polttoaineiden hinnan nousun sekä ilmasto- ja energiapolitiikan ohjaamana. Lerkka-biokaasulaitoksessa on 25 m³:n pyörivä vaakaan sijoitettu biokaasureaktori, jonka lämmitysjärjestelmän suunnittelua varten rakennetulla pienoismallilla tutkittiin lämmönsiirtymistä biomassaan.

Oulun ammattikorkeakoulun LVI-laboratoriossa suoritettujen mittausten avulla laadittiin lopullinen mitoitus lämmityslaitteistolle. Mittauksissa tutkittiin biomassan koostumuksen ja pyörivän liikkeen vaikutusta lämmönsiirtoon sekä sitä, onko reaktorin kuorta mahdollista käyttää ripana lämmönsiirron tehostamiseksi.

Työn aikana havaittiin, että massan koostumuksella ja sen liikkeellä on suuri vaikutus lämmönsiirtoon ja nämä seikat on huomioitava lämmityslaitteistoa suunniteltaessa. Ripavaikutuksen hyöty jäi käytännön mittauksissa arvioitua huomattavasti pienemmäksi, mutta biomassan koostumuksen vaikutus oli huomattavasti arvioita suurempi.

Asiasanat: Biokaasu, lämmönsiirtyminen, kestäväkehitys

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
SISÄLLYS.....	4
1 JOHDANTO	6
2 BIOKAASU	7
2.1 Biokaasun tuottaminen	8
2.2 Biokaasulaitokset	8
2.3 Täyssekoitusreaktori	8
2.4 Tulppavirtausreaktori	8
2.5 Käyttö	9
2.5.1 Lämmityskäyttö	9
2.5.2 Sähkön ja lämmön tuotanto (CHP)	9
2.5.3 Biokaasun liikennekäyttö.....	10
3 LÄMMITYSLAITTEISTON MITOITUS	11
3.1 Lämmitystehontarve	11
3.1.1 Johtumishäviöt	11
3.1.2 Biomassan lämmittämiseen kuluva energia	11
3.2 Toisiolämmönsiirtimen mitoitus	12
4 LERKKA-BIOKAASULAITOS	15
4.1 Pienoismalli	16
4.2 Mittaukset.....	18
4.3 Massan sekoittamisen vaikutus.....	19
5 MITTAUSTULOKSET	20
5.1 Massan kuiva-ainepitoisuus	20
5.2 Kuorenripa- ja sekoituksen vaikutus lämmönsiirtoon.....	20
6 LÄMMITYSTEHONTARVE.....	22
7 LÄMMITYSLAITTEISTON MITOITUS	23
7.1 ensiölämmönsiirrin	23
7.2 Putkilämmönsiirtimen mitoitus	23
7.3 Syöttölaitteen lämmitys.....	24
7.4 Pumput.....	25
7.5 Säätoventtiilit	25

7.6	Paisunta- ja varolaitteet.....	26
7.7	Automaatio	26
8	YHTEENVETO	27
	LÄHTEET.....	28
	LIITTEET	29

1 JOHDANTO

EU:n ilmasto- ja energiapolitiikasta annettiin lainsäädäntöpaketti huhtikuussa 2009. Tämä niin sanottu 20-20-20-tavoite tarkoittaa, että vuoteen 2020 mennessä EU:n energian kulutuksesta tulisi saada 20 % uusiutuvista lähteistä, EU:n kasvihuonepäästöjä tulisi vähentää 20 % sekä energiatehokkuutta lisätä 20 %. Tämän tavoitteen saavuttaminen vaati uusiutuvien energianlähteiden kehittämistä ja käyttöönottoa, missä biokaasu tulee olemaan yhtenä merkittävänä energiamuotona.

Työn tilaaja on Bio JJJJ Oy ja opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella nykyaikainen ja elinkaarikustannuksiltaan tehokas lämmitysjärjestelmä yrityksen kehitteillä olevaan uuden tyyppiseen Lerkka-biokaasulaitokseen. Lerkka on maatilojen, kotien ja suurtalouksien tarpeisiin suunniteltu biokaasuvoimala, jonka tuottama biokaasu soveltuu moneen käyttökohteeseen. Lerkka-biokaasulaitoksessa on 25m³:n pyörivä vaakaan sijoitettu reaktori, jonka lämpötila on saatava pysymään vakiona prosessin aikana ympärivuoden tehokkaan kaasun tuotannon saavuttamiseksi.

Työssä on tutkittu erityisesti pyörivästä liikkeestä ja biomassasta aiheutuvia tekijöitä, jotka vaikuttavat lämmönsiirtymiseen reaktorin sisällä. Työn aikana reaktorista rakennetaan pienoismalli, jolla tutkitaan Oulun ammattikorkeakoulun LVI-laboratoriossa mm. biomassan koostumuksen ja pyörivän liikkeen vaikutusta lämmönsiirtoon sekä mahdollisuutta käyttää reaktorin kuorta ripana lämmönsiirron tehostamiseksi.

2 BIOKAASU

Biokaasu on biologisen hajoamisprosessin tulos. Biokaasua muodostuu, kun orgaaninen aine hajoaa hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa. Hapettomuus on keskeistä sille, että eloperäistä ainesta voidaan mädättää biokaasuksi. Mikäli happea on läsnä, biologinen hajoaminen tapahtuu kompostoitumisen kautta. Biokaasu on kaasuseos, joka sisältää noin kaksi kolmasosaa metaania CH_4 ja yhden kolmasosan hiilidioksidia CO_2 sekä hyvin pieninä pitoisuuksina mm. rikkiyhdisteitä. Biokaasun koostumus on esitetty taulukossa 1. Biokaasu on arvokas polttoaine, ja sitä voidaan käyttää lämmön- ja sähköntuottamiseksi, tai se voidaan jatkojalostaa liikennepolttoaineeksi, jolloin sitä voidaan käyttää ajoneuvoissa. (1.)

TAULUKKO 1 Biokaasun koostumus (1, s. 3)

Aine	%
Metaani, CH_4	55 - 75
Hiilidioksidi, CO_2	25 - 45
Hiilimonoksidi, CO	0 – 0,03
Typpi, N_2	1 – 5
Vety, H_2	0 – 3
Rikkivety, H_2S	0,1 – 0,5

Biokaasua muodostuu jatkuvasti luonnostaan mm. kosteikoissa, vesistöjen pohjakerroksissa sekä eläinten suolistossa. Biokaasu on 100-prosenttisesti uusiutuva energianlähde, jonka hiilidioksidipäästöt ovat merkittävästi pienemmät kuin fossiilisilla polttoaineilla. (1.)

EU:n ilmasto- ja energiapolitiikasta annettiin lainsäädäntöpaketti huhtikuussa 2009. Tämä niin sanottu 20-20-20-tavoite tarkoittaa, että vuoteen 2020 mennessä EU:n energian kulutuksesta tulisi saada 20 % uusiutuvista lähteistä, EU:n kasvihuonepäästöjä tulisi vähentää 20 % sekä energia tehokkuutta lisätä 20 %. Tämän tavoitteen saavuttaminen vaati uusiutuvien energianlähteiden kehittämistä ja käyttöön ottoa, jossa biokaasu tulee olemaan yhtenä energiamuotona. (2.)

2.1 Biokaasun tuottaminen

Biokaasua tuotetaan mädättämällä biomassaa anaerobisissa olosuhteissa. Kaasun muodostuminen voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen, joissa kussakin toimii eri bakteerikannat. Metaania syntyy vain yhdessä vaiheessa prosessia, joten tätä prosessin vaihetta ja sen bakteerikantaa pyritään ylläpitämään luomalla sille parhaat mahdolliset olosuhteet. Tämän edellytyksenä on, että massan lämpötila, koostumus ja vaihtuvuus ovat bakteereille sopivia. (1.)

2.2 Biokaasulaitokset

Biokaasun tuotantoon on kehitetty monenlaisia teknisiä ratkaisuja. Reaktorit voidaan jakaa karkeasti kahteen perustyyppiin, joita ovat täyssekoitus- ja tulppavirtausreaktori.

Biokaasulaitoksen reaktori on yleensä teräksestä tai betonista rakennettu säiliö, jonka sisällä biomassaa lämmitetään jollakin ulkoisella lämmönlähteellä. (2.)

2.3 Täyssekoitusreaktori

Suomessa yleisin biokaasulaitoksen tyyppi on täyssekoitteinen, jatkuvatoiminen märkämädätysprosessi. Prosessiin lisätään biomassaa säännöllisesti esimerkiksi kerran tunnissa tai kerran vuorokaudessa. Myös käsiteltyä massaa poistetaan reaktorista tasaisesti, yleensä ennen syöttöä oikovirtauksen estämiseksi. Massan viipymäaika pyritään näin saamaan otolliseksi metaanin tuotannon kannalta. Tyypillisesti märkäprosessissa kuluu lämmitykseen noin 10–40 % tuotetun biokaasun energiasta lämmitystavasta ja eristyksestä riippuen. (2.)

2.4 Tulppavirtausreaktori

Erityisesti kuiville materiaaleille soveltuva reaktortyyppi, jossa käsiteltävä massa kulkee syötetyssä järjestyksessä läpi prosessin. Näin saavutetaan lähes vakio massan viipymäaika. Tulppavirtaus saadaan aikaiseksi putkimaisessa reaktorissa, jossa toisesta päästä syötetään ja toisesta päästä puretaan massaa. Uusi massa ei pääse sekoittumaan vanhan kanssa, joten prosessista kerättyä bakteeripitoista nestettä syötetään massan sekaan prosessin nopeuttamiseksi. (2.)

2.5 Käyttö

Biokaasun käyttöön on erilaisia vaihtoehtoja. Laitosta suunniteltaessa on hyvä kartoittaa, missä käytössä biokaasusta saadaan paras hyöty.

2.5.1 Lämmityskäyttö

Lämmitys biokaasun hyödyntämiskeinona on investoinneiltaan pieni ja vain vähän huoltoa ja valvontaa tarvitseva ratkaisu. Kaasu voidaan ohjata vedenerotuksen jälkeen matalassa paineessa suoraan kaasupolttimelle, jolla se poltetaan. Lämmityskäytössä biokaasua ei tarvitse vedenerottamisen jälkeen jalostaa. Kaasupolttimien hyötysuhde on hyvin korkea, ja lämmön tuotannon hyötysuhde voi olla jopa 95 %, jolloin biokaasun energiasisällöstä jää hyödyntämättä vain 5 %. (2, s. 45.)

2.5.2 Sähkön ja lämmön tuotanto (CHP)

Biokaasun käyttö sähkön ja lämmön yhteistuotannossa on yleisesti käytössä oleva biokaasun hyödyntämiskeino. Biokaasu ohjataan veden erotuksen jälkeen polttomoottorille, joka pyörittää sähköä tuottavaa generaattoria. Kaasua voidaan polttaa myös mikroturbiinilaitoksissa, mutta ne eivät sovellu suurempien investointikustannuksien vuoksi pienen kokoluokan laitoksiin. Lämpöä otetaan talteen laitosten jäähdytysjärjestelmistä ja pakokaasuista. Sähköntuotannossa päästään 25–40 %:n hyötysuhteisiin sekä moottoreissa että mikroturbiineissa. Lämmöstä voidaan teknisesti ottaa suhteellisen helposti lämpöä talteen 35 % kaasun sisältämästä energiasta. Lämmön hyötysuhdetta on mahdollista nostaa jopa 60 % biokaasunenergia sisällöstä, mutta tämä nostaa kustannuksia pienen kokoluokan laitoksissa yleensä niin paljon, ettei sitä katsota kannattavaksi. Suurimmilla laitoksilla voidaan päästä jopa 70–90 %:n kokonaishyötysuhteeseen sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. (2, s. 45.)

2.5.3 Biokaasun liikennekäyttö

Biokaasu voidaan jalostaa myös liikennekäyttöön soveltuvaksi polttoaineeksi. Poistamalla kaasusta hiilidioksidi ja mahdolliset rikkiyhdisteet, jää jäljelle vain puhdas metaani joka voidaan rinnastaa maakaasuun. Jalostettua biokaasua voidaan käyttää kaikissa bensiinimoottoreissa, joihin on asennettu kaasusäiliö ja kaasun annostelulaitteisto. Bi-fuel-autoissa on tankki sekä bensiinille että biokaasulle ja mono-fuel-autoissa pelkästään biokaasulle. (3). Dieselmoottori on myös mahdollista muuttaa biokaasulla toimivaksi. Yleensä moottorit pidetään kuitenkin puristussytytteisinä, eli biokaasun sekaan syötetään vähän dieselöljyä (Dual-fuel), jolloin erillistä sytytysjärjestelmää ei tarvita. (4).

3 LÄMMITYSLAITTEISTON MITOITUS

3.1 Lämmitystehontarve.

Lämmitystehontarvetta määriteltäessä on päätettävä alin mahdollinen lämpötila, jolla laitoksen on pystyttävä tuottamaan biokaasua. Mitoituslämpötilaksi määritettiin -40 °C . Tehon tarvetta määriteltäessä päätetään myös, kuinka nopeasti laitoksen on kyettävä saavuttamaan käyttölämpötila mahdollisen käyttökatkoksen jälkeen.

3.1.1 Johtumishäviöt

Säiliön vaipan kautta tapahtuva lämpöhäviö riippuu vaipan pinta-alasta, ominaislämpövastuksesta sekä sisä- ja ulkopinnan välisestä lämpötilaerosta. Vaipan lämpöhäviö lasketaan kaavalla 1.

$$\dot{Q} = A * U * \Delta T$$

KAAVA 1

\dot{Q} = teho (W)

A = pinta-ala (m^2)

U = U-arvo ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)

ΔT = sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötila ero

3.1.2 Biomassan lämmittämiseen kuluva energia

15 vuorokauden viipymäajalla säiliöön syötetään massaa $1,67\text{ m}^3$ vuorokaudessa kahdeksassa erässä, jolloin kerta-annoksen määräksi tulee noin $0,208\text{m}^3$. Kahdeksalla syöttökerralla syöttökerrojen välinen aika on 3 tuntia, joten siinä ajassa massa on saatava lämmitettyä, jotta reaktorin lämpötila saadaan ylläpidettyä. Biomassan vähäisen kuiva-ainepitoisuuden vuoksi käytetään massan ominaislämpökapasiteettinä veden arvoa $4,2\text{ kJ/kg °C}$. Biomassan lämmittämiseen kuluva energia lasketaan kaavalla 2.

$$E = q * \rho * cp * \Delta T * t$$

KAAVA 2

E = energia (kJ/kg)

q = virtaama (m³/s)

ρ = tiheys (kg/m³)

cp = ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg °C)

ΔT = lämpötilaero (°C)

t = lämmitysaika

3.2 Toisiolämmönsiirtimen mitoitus

Säiliössä olevaa massaa lämmitetään sisäpuolisella putkilämmönsiirtimellä, jolloin lämpö siirtyy vedestä putkenseinämän kautta lämmitettävään massaan. Lämmönsiirtimen mitoituksessa on tiedettävä kokonaislämmönläpäisykerroin U , joka lasketaan kaavalla 3.

$$U = \frac{1}{Rt}$$

KAAVA 3

U = kokonaislämmönläpäisykerroin (W/m² °C)

Rt = kokonaislämmönvastus (m² W/°C)

Kokonaislämmönvastusta Rt laskettaessa putkelle on huomioitava putken pyöreä muoto, jolloin putken pinta-ala kasvaa ulkokehää kohti. Tämä on otettu huomioon kaavassa 4.

$$Rt = \frac{1}{\pi * d1 * \alpha s} + \frac{\ln \frac{d2}{d1}}{2 * \pi * \lambda} + \frac{1}{\pi * d2 * \alpha u}$$

KAAVA 4

$d1$ = putkensisähalkaisija (m)

$d2$ = putkenulkohalkaisija (m)

λ = lämmönsiirtymiskerroin (W m/ °C)

αs = sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin (W/m² °C)

αu = ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin (W/m² °C)

Lämmönsiirtokertoimen α määrittämiseksi on virtaukselle pystyttävä määrittelemään Nusseltin luku. Luvun laskemiseksi on tiedettävä, onko virtaus turbulenttinen vai laminaarinen. Virtauksen laatua voidaan kuvata Reynoldsin luvun avulla. Reynoldsin luku on dimensioton luku, joka kertoo onko virtaus laminaarista vai turbulenttista. Reynoldsin luvun ollessa alle 2300 on virtaus täysin laminaarinen, 2300 - 4000 on siirtymäalue ja yli 10 000 on täysin turbulenttinen. Lämmönsiirron

kannalta laminaarinen virtaus ei ole edullinen joten tässä käsitellään lämmönsiirtokertoimen määrittäminen turbulenttiselle virtaukselle. Kaavassa 5 on esitetty lämmönsiirtokertoimen laskenta.

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d} \quad \text{KAAVA 5}$$

α = lämmönsiirtokerroin

Nu = Nusseltin luku

λ = lämmönsiirtymiskerroin

d = putken halkaisija

Nusseltin luku voidaan määrittää turbulenttisessa virtauksessa kokemusperäisen kaavan 6 avulla.

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^n \quad \text{KAAVA 6}$$

Re = Reynoldsin luku

Pr = Prandtlin luku

$n = 0,4$ kun fluidin lämpötila on ympäristön lämpötilaa suurempi

$n = 0,3$ kun fluidin lämpötila on ympäristön lämpötilaa pienempi

$$Re = \frac{v d}{\gamma} \quad \text{KAAVA 7}$$

v = fluidin nopeus putkessa

d = putken halkaisija

γ = kinemaattinen viskositeetti

$$Pr = \frac{\varphi \gamma c_p}{\lambda} \quad \text{KAAVA 8}$$

γ = kinemaattinen viskositeetti

λ = lämmönsiirtymiskerroin

c_p = ominaislämpö kapasiteetti

Lämmönsiirtokertoimen määrittämiseksi putken pinnalta biomassaan ei ole olemassa työn tekohetkellä aineistoa tarjolla, joten lämmönsiirtokertoimen määrittystä varten päätettiin rakentaa laitoksen reaktorista pienoismalli. Biokaasureaktorin putkilämmönsiirtimen meno- ja paluuveden lämpötiloja valittaessa on huomioitava seuraavia asioita. Menoveden lämpötila ei saa nousta liian korkeaksi, koska bakteerien toiminta häiriintyy. Virtauksen tulee olla riittävän suuri, ettei laminaarinen virtaus häiritse lämmönsiirtymistä. Lämmönsiirtimen logaritminen keskilämpötila vaikuttaa käänteisesti tarvittavaan lämmönsiirto pinta-alaan. Logaritminen keskilämpötila voidaan määrittää kaavalla 9.

$$T_{ln} = \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{T_1}{T_2}} \quad \text{KAAVA 9}$$

T_{ln} = logaritminen lämpötilaero

T_1 = menolämpötila

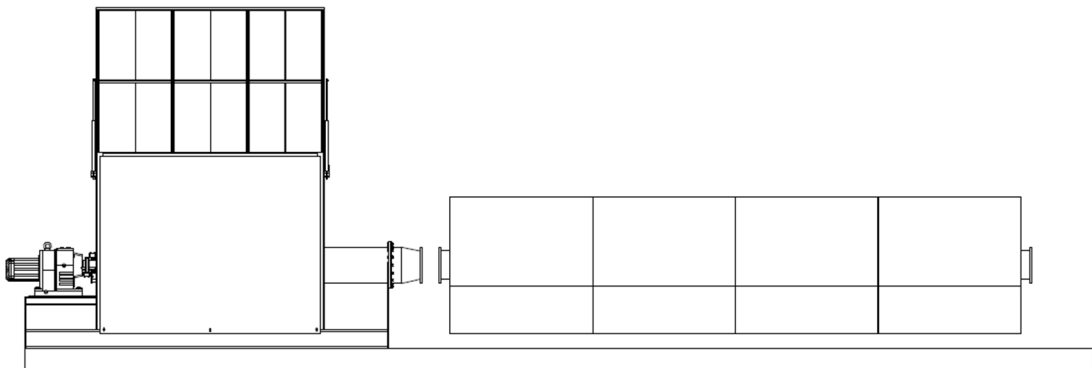
T_2 = paluulämpötila

Säätöventtiilin auktoriteetti lasketaan kaavalla 10.

$$\beta = \frac{\text{Venttiilin painehäviö}}{\text{Säädettävän piirin painehäviö}} \quad \text{KAAVA 10}$$

4 LERKKA-BIOKAASULAITOS

Lerkka-biokaasulaitoksessa metaania tuotetaan pyörivässä vaakareaktorissa. Massan sekoittuminen tapahtuu pumppujen sijaan reaktorin seinissä olevien sekoituslevyjen avulla. Kuiva-ainepitoisuuden rajoittavana tekijänä ei ole pumppujen mekaaninen kestävyys, vaan reaktorissa voidaan käyttää myös korkeamman kuiva-ainepitoisuuden massoja. Sylinterin muotoiseen säiliöön syötetään biomassaa syöttölaitteen ruuvilla, joka repii, silppuaa ja hiertää massaa bakteereille sopivaksi. Syöttölaitteeseen rakennetaan lämmönsiirrin, jolla massa saadaan pidettyä sulana ja mahdollisesti esilämmitettyä ennen reaktoriin syöttämistä. Säiliötä pyöritettäessä sen sisällä olevat sekoituslevyt sekoittavat biomassaa, jotta massassa neste ei erottuisi kuiva-aineksestä. Kaasuuntunut biokaasu kerätään talteen säiliön toisesta päästä nousuputkella, josta se johdetaan kaasukelloon. Prosessin läpikäynyt massa puretaan kaasun kanssa samasta päädyistä, minkä jälkeen se voidaan käyttää lannoitteeksi pellolla. (5.) Kuvassa 1 on esitetty biokaasulaitteiston syöttölaite ja reaktori.



KUVA 1. Biokaasulaitos

Biomassan lämmönjohtavuutta ja sekoittamisen vaikutusta lämmönsiirtoon ei tiedetä. Pyörivän liikkeen vaikutus lämmönsiirtymiseen ei myöskään ole tiedossa, joten reaktorista rakennettiin pienoismalli. Pienoismallille tehtyjen mittauksien avulla voidaan laitteiston mitoitus tarkentaa jotta saadaan rakennettua toimiva laitos ilman ylimitoitusta. Pienoismallilla tutkittiin lämmönsiirtymistä metallista massaan, sekoittamisen vaikutusta lämmönsiirtymiseen ja reaktorikuoren käyttämistä ”ripana” lämmönsiirron tehostamiseksi.

4.1 Pienoismalli

Pienoismalli rakennettiin sylinterin muotoisesta metallisäiliöstä. Säiliön vaippaan tehtiin massaa varten täyttöluukku ja sen sisään asennettiin lämmitysputket, sekoituslevyt, tarvittavat lämpötilanturit ja varoventtiili. Lämmitysputkia asennettiin säiliöön neljä kappaletta. Kaksi putkea on kosketuksessa suoraan massaan ja kaksi putkea on hitsattu toiselta laidalta säiliöön kiinni. Jälkimmäisen asennus tavan tarkoituksena on testata, voiko itse säiliön kuorta käyttää ”ripana” tehostamaan lämmönsiirtymistä. Kuvassa 2 on näkyvissä asennetut lämmitysputket.



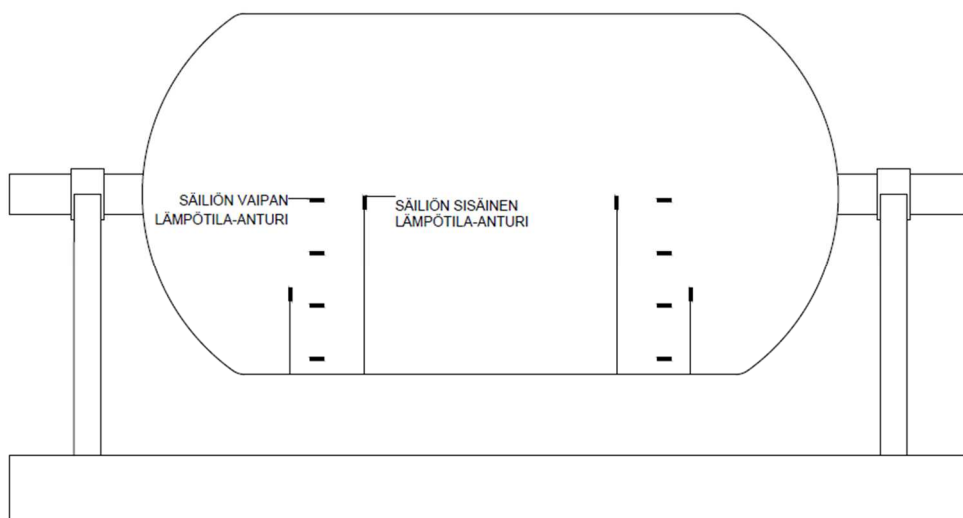
KUVA 2. Lämmitysputket- ja sekoituslevyt asennettuna

Kuvassa 3 on esitetty säiliönkuoreen hitsatun lämmitysputken poikkileikkaus.



KUVA 3. Poikkileikkaus "rivasta"

Säiliölle rakennettiin teline jossa sitä voitiin pyörittää kokeen aikana massan sekoittamiseksi. Lämpötilanmittausta varten säiliöön asennettiin antureita yhteensä 12 kappaletta. Neljä anturia sijoitettiin säiliön sisälle massan lämpötilan mittausta varten ja kahdeksan anturia asennettiin säiliön ulkokuoreen sen lämpenemisen seuraamiseksi. Lämpötila-anturien sijainnit on esitetty kuvassa 4.



KUVA 4. Lämpötila-anturien sijainnit

Tehon mittausta varten säiliön menovesiputkeen asennettiin Kamstrup-energianmittausyksikkö sekä meno- ja paluuvesianurit. Paluuputkeen asennettiin linjasäätöventtiili, jolla virtaama saatiin säädettyä halutuksi. Säiliö eristettiin 50 millimetrin paksuisella alumiinipinnoitetulla kivivillamatolla, ympäröivän ilman lämpövaikutuksen minimoimiseksi. Kuvassa 5 on reaktorin pienoismalli.



KUVA 5. Reaktorin pienoismalli

4.2 Mittaukset

Mittauksissa tutkittiin lämmönsiirtyminen massaan ja lämmönjohtuminen massassa sekä sekoittamisen vaikutus lämmönsiirtoon. Samalla tutkittiin myös mahdollisuutta käyttää itse säiliötä lämmönluovutuspinna. Säiliön lämmityslaitteiston läpi laskettiin vettä vakiovirtaamalla sekä -lämpötilalla ja kokeen aikana seurattiin massan, säiliön ja veden lämpötiloja. Mittauksia tehtiin yhteensä 6 kpl kahdella erilaisella massalla ja vedellä, jolloin nähtiin massan ominaisuuksien vaikutus lämmönsiirtoon.

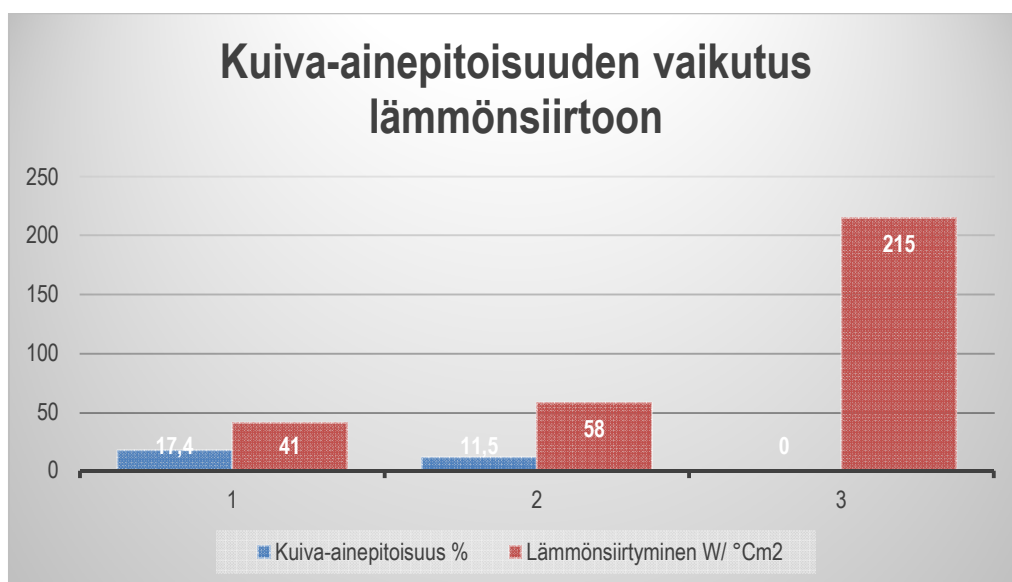
4.3 Massan sekoittamisen vaikutus

Sekoittamisen vaikutusta tutkittiin kolmella eritavalla. Massaa sekoitettiin jatkuvasti 5 ja 30 minuutin välein. Tehon mittauksen perusteella voitiin määritellä lämmönsiirron kannalta edullisin sekoitusväli, jolloin lämmityslaitteisto toimii parhaalla mahdollisella tavalla. Säiliön kuoren ripavaikutuksen tutkimista varten säiliön kuoreen asennettiin 8 kpl lämpötila-antureita, joilla voitiin mitata lämmönsiirtymistä kuoressa. Lämmön siirtymisen mittausten perusteella voidaan laskea edullisin asennusväli kuoreen hitsattaville putkille.

5 MITTAUSTULOKSET

5.1 Massan kuiva-ainepitoisuus

Massan kuiva-ainepitoisuuden vaikutusta lämmönsiirtoon tutkittiin kahdessa eri mittauksessa eri massoilla sekä vedellä. Mittauksissa huomattiin, että jo vähäinen kuiva-ainepitoisuus huonontaa lämmön siirtymistä merkittävästi verrattuna puhtaaseen veteen tapahtuvaan lämmönsiirtoon. Kuiva-aine massassa huonontaa veden vapaata konvektiota, jolloin lämmönsiirtyminen huononee. Kuiva-aine toimii myös itsessään eristeenä, jossa lämmön siirtyminen on huonoa. Kuvassa 6 on esitetty kuiva-ainepitoisuuden vaikutus lämmönsiirtoon.

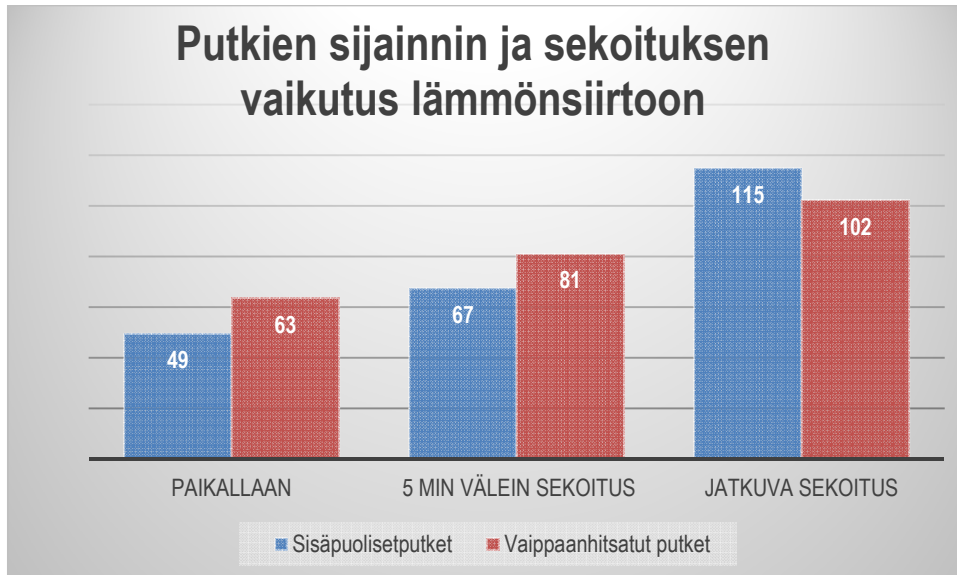


KUVA 6. Kuiva-ainepitoisuuden vaikutus lämmön siirtoon

5.2 Kuorenripa- ja sekoituksen vaikutus lämmönsiirtoon

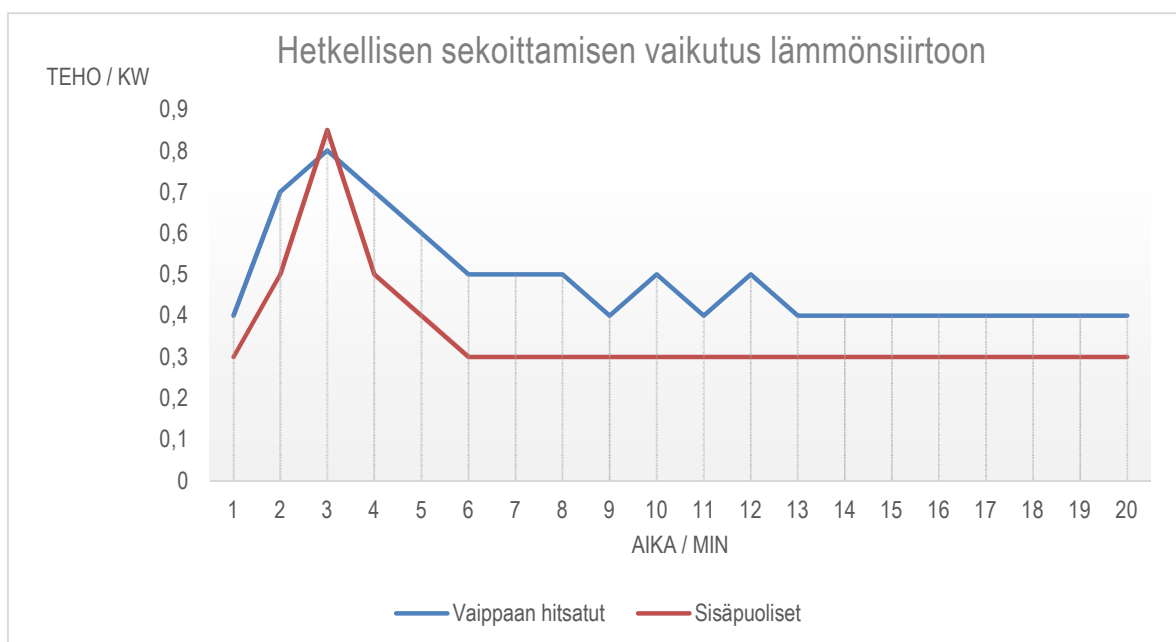
Kuoren ripavaikutus lämmönsiirtymiseen riippui massan ominaisuuksista sekä sekoittamisesta. Sisäpuoliset lämmitysputket, jotka ovat suoraan kosketuksissa vain massan kanssa, luovuttavat lämpöä säiliön kuoreen hitsattuja paremmin, kun massaa sekoitettiin jatkuvasti. Tällöin säiliön ripavaikutuksen hyöty jää pienemmäksi kuin sekoittamisen ja sisäpuoliset putket luovuttavat lämpöä paremmin. Pidettäessä massaa paikoillaan tai sekoitettaessa 5 minuutin välein säiliön ripavaikutus parantaa lämmön siirtymistä. Massaa sekoittamalla voidaan siis vaikuttaa lämmön siirtymiseen huomattavasti. Massaa jatkuvasti sekoitettaessa lämmönsiirtoteho saadaan suoraan massan

kanssa kosketuksissa olevilla putkilla yli kaksinkertaiseksi ja säiliön kuoreen hitsatuilla noin puoli-toistakertaiseksi verrattuna paikoillaan olevaan massaan. Kuvassa 7 on esitetty sekoituksen vaikutus lämmön siirtymiseen.



KUVA 7. Putkien sijainnin ja sekoituksen vaikutus lämmönsiirtoon

Massan sekoittamisella saavutettu hyöty on kuitenkin hyvin lyhytaikainen ja huipputehon saamiseksi on massaa sekoitettava lähes jatkuvasti. Kuvassa 8 on kuvattu hetkellisen sekoittamisen vaikutus lämmönsiirtymiseen molemmilla kytkentätavoilla. Kuvasta voidaan päätellä, että sekoittamisen vaikutus lämmön siirtymiseen on huomattavasti suurempi kuin kuoren ripavaikutus.



KUVA 8. Hetkellisen sekoittamisen vaikutus lämmönsiirtoon

6 LÄMMITYSTEHONTARVE

Biokaasureaktorin ja sen syöttölaitteen lämmitystehon tarve laskettiin kaavan 1 avulla.

Reaktorin vaipan läpi tapahtuva lämpöhäviö

$$\emptyset = 52m^2 * 0,25 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * (40 - (-32))^\circ C = 936W$$

Reaktorin kylmäsiltojen aiheuttama lämpöhäviö

$$\emptyset = 0,025m^2 * 580 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * (40 - (-32))^\circ C = 1044W$$

Syöttölaitteen vaipan läpi tapahtuva lämpöhäviö

$$\emptyset = 42m^2 * 0,25 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * (40 - (-0))^\circ C = 420W$$

Syöttölaitteen kylmäsiltojen aiheuttama lämpöhäviö.

$$\emptyset = 0,0125m^2 * 580 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * (40 - (-32))^\circ C = 522W$$

Kokonaislämpöhäviö.

$$\emptyset_{kok} = 936W + 1044W + 420W + 522W = 2,922kW$$

Biomassan lämmittämiseen kuluva teho saadaan kaavasta 2.

$$E = 1,68 \frac{m^3}{d} * 900 \frac{kg}{m^3} * 4,2 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} * (40 - (0))^\circ C * \frac{d}{3600s * 24h} = 2,94kW$$

Tasapainotilan saavuttamiseksi on biomassaa lämmitettävä teholla 2,92 kW+2,94 kW= 5,86 kW.

Reaktorissa tarvittava lämmitysteho on 0,94 kW+1,04 kW+2,94 kW = 4,92 kW.

Syöttölaitteen tarvitsema lämmitysteho on 0,42 kW+5,2kW= 5,62 kW.

7 LÄMMITYSLAITTEISTON MITOITUS

Lämmitystehontarpeen määrittämisen ja massan lämmönsiirtokerroimen selvityksen jälkeen voitiin mitoittaa laitoksen lämmitysjärjestelmä. Vaakareaktorissa käytettävän biomassan kuiva-ainepitoisuus tulee olemaan korkeampi kuin perinteisen biokaasulaitoksen. Käytettävän biomassan kuiva-ainepitoisuus voi olla laitoksen käydessä jopa 20 % joten toisiolämmönsiirrin on mitoitettava sen mukaan. Reaktoria lämmitetään tilan omalla hakekattilalla ja lämmitysvesi johdetaan reaktorille maahan upotetulla eristetyllä putkistolla.

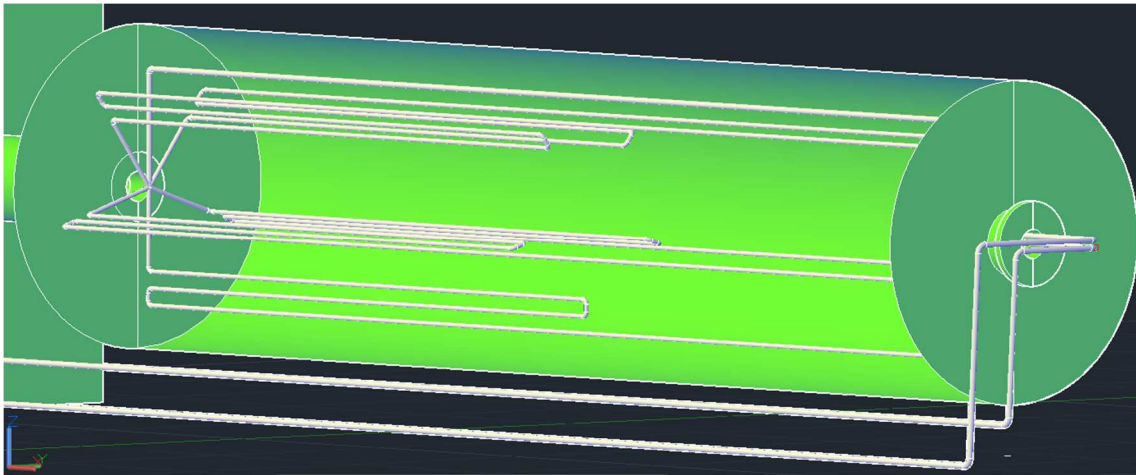
7.1 ensiölämmönsiirrin

Ensiölämmönsiirrin mitoitettiin Danfoss-mitoitusohjelmalla. Ensiöpuolen menolämpötilaksi valittiin +75 °C ja paluulämpötilaksi +50 °C. Toisiopuolen menolämpötila on +50 °C ja paluu +42 °C, jolloin ensiöpuolen virtaamaksi tulee 0,057 l/s ja siirtimen asteisuudeksi 3 °C.

7.2 Putkilämmönsiirtimen mitoitus

Käytännön syistä lämmittämistä varten päätettiin rakentaa reaktorin sisäpuolinen putkilämmönsiirrin. Putken valinnassa iteroitiin meno- ja paluulämpötilojen, lämmönsiirtopinta-alan ja virtausnopeuden perusteella parasta vaihtoehtoa. Menolämpötilan valinnassa rajoittavana tekijänä on bakteerien lämmönsietokyky. Parhaaksi vaihtoehdoksi tähän tapaukseen osoittautui DN 20 ”musta” teräspannputki. 20 %:n kuiva-ainepitoisuudella tarvittava lämmitysteho saavutetaan 9,8m²:n pinta-alalla, jolloin lämmönsiirtimessä on oltava 120 metriä putkea.

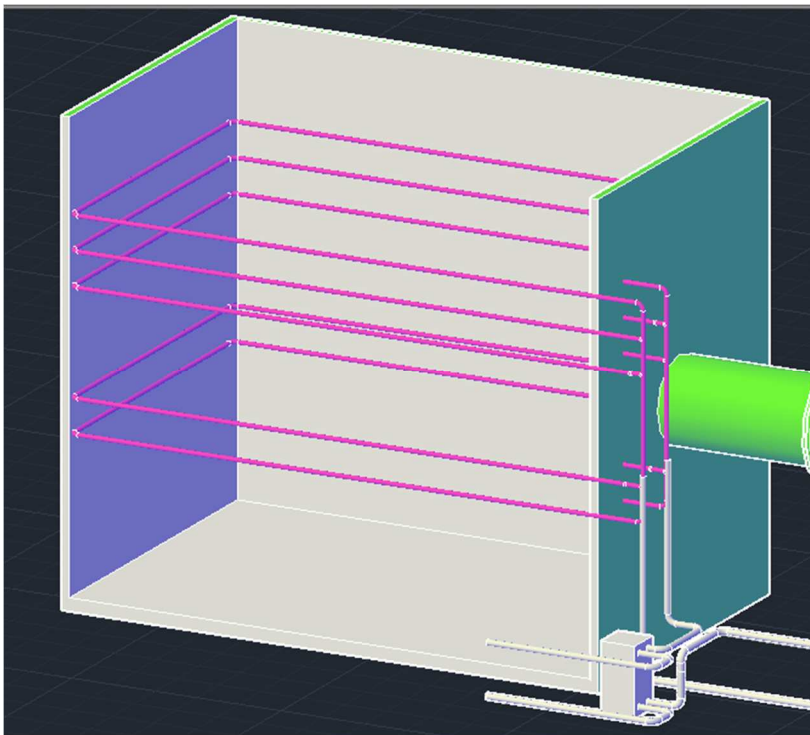
Reaktorin sisäpuolelle asennetaan massan sekoitusta varten sekoituslevyt, joihin lämmityspannputket kiinnitetään hitsaamalla. Lämmönsiirtimessä suurin pinta-ala on sijoitettu reaktorin alkupäähän, josta kylmä massa syötetään reaktoriin. Massa saadaan näin lämpenemään mahdollisimman nopeasti oikeaan lämpötilaan. Lämmönsiirtimen pinta-ala ja lämpötila pienenevät reaktorin purkupäätä kohti, jossa tehon tarve on pienempi ja rajoittuu massan lämpimänä pitämiseen. Virtaamalla 0,4 l/s siirtimen painehäviöksi on laskettu 5,02 kPa. Kuvassa 9 on esitetty reaktorin lämmönsiirrin.



KUVA 9. Reaktorin lämmönsiirrin

7.3 Syöttölaitteen lämmitys

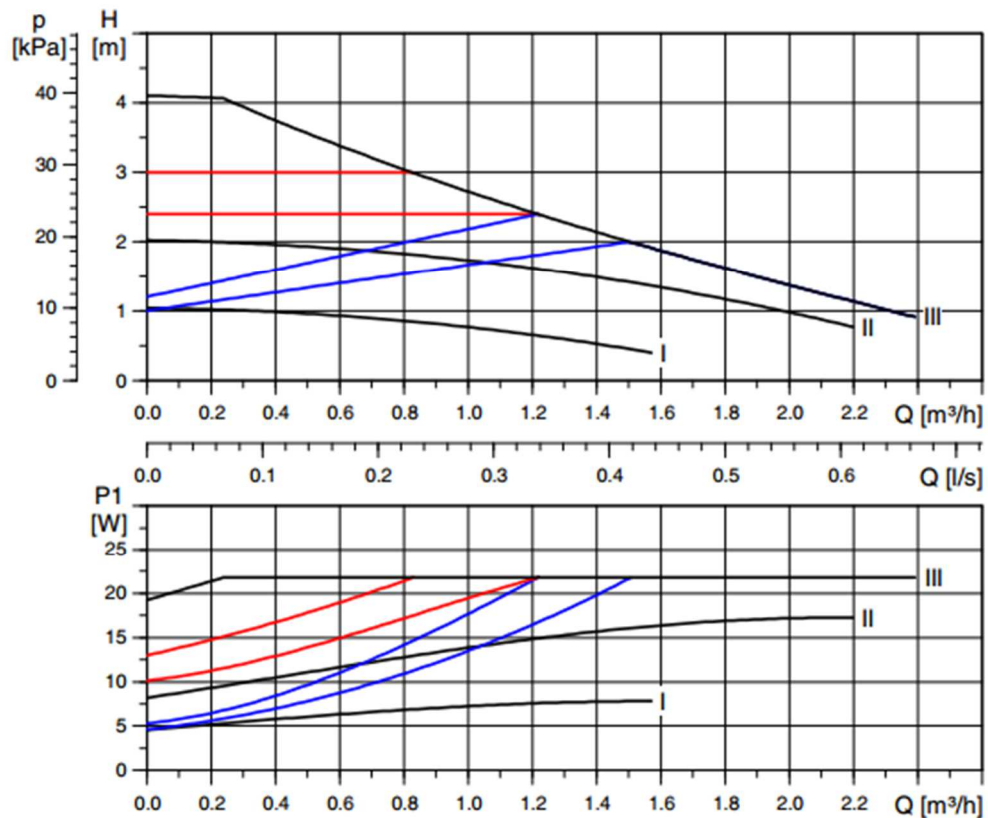
Syöttölaitetta lämmitetään samankaltaisella putkilämmönsiirtimellä kuin reaktoria. Syöttölaitteen siirtimelle johdetaan reaktorin lämmönsiirtimen paluuvesi, jolla syöttölaitteessa oleva massa saadaan pidettyä sulana talviaikaan. Syöttölaitteen painehäviöksi on laskettu mitoitusvirtaamalla 1,6 kPa. Kuvassa 10 on esitetty syöttölaitteen lämmönsiirrin.



KUVA 10. Syöttölaitteen lämmönsiirrin

7.4 Pumput

Reaktorin lämmitysverkoston virtaaman ja painehäviön laskennan jälkeen mitoitettiin järjestelmään pumput, joilla tarvittavat virtaukset saadaan aikaiseksi. Ensiöpuolella tarvittava virtaama on 0,057 litraa sekunnissa ja painehäviö 6 kPa. Toisiopuolella tarvittava virtaama on 0,4 litraa sekunnissa ja painehäviö 6,7 kPa. Molemmat toimintapisteet saavutetaan Grundfoss Alpha 2 L 25 - 40 180 50 Hz-pumpuilla. Kuvassa 11 on esitetty pumpun kapasiteettikäyrät.



TM04 2110 2008

KUVA 11. Grundfoss alpha 2 -kapasiteettikäyrät (7, s. 29)

7.5 Säätoventtiilit

Reaktorin tarvitsemaa lämpötehoa säädetään rajoittamalla hakekattilalta tulevaa menoveden määrää moottoriventtiilillä TV1. Syöttölaitteen lämmityksen säätö tapahtuu 3-tieventtiilillä, jolla säädetään syöttölaitteen lämmönsiirtimen läpikulkevaa vesivirtaa. Moottoriventtiilien mitoituksessa käytettiin apuna Belimo Oy:n mitoitusohjelmaa. Kolmitieventtiilin mitoituksen lähtökohtana oli saavuttaa 0,5 auktoriteetti säädettävään piiriin nähden. Kaksitieventtiilin auktoriteetti puolestaan haluttiin olevan 1,0.

7.6 Paisunta- ja varolaitteet

Ensiöpuolen paisunta-ja varolaitteet jäivät ennalleen, koska verkoston tilavuuden muutos jää hyvin pieneksi. Toisiopuolen varoventtiilin kooksi valittiin lämmönsiirtimen tehonperusteella DN15 ja avautumispaineeksi 1,5 bar. Toisiopuolen verkoston tilavuudeksi laskettiin 77 litraa joten 1 barin esipaineella paisunta-astiaksi valittiin 8 litran paisunta-säiliö.

7.7 Automaatio

Biokaasulaitteisto varustetaan Siemensin automaatiojärjestelmällä, jonka avulla reaktorin olosuhteet pidetään biokaasuntuotannon kannalta parhaana mahdollisena. Reaktorissa olevan massan lämpötilaa säädetään anturin TE01 mittauksen perusteella muuttamalla moottoriventtiili TV1 asentoa. Ulkolämpötila-anturin TE00 mittauksen perusteella menoveden lämpötilaa kompensoidaan ulkolämpötilan mukaan. Kun reaktorin lämpötila laskee menoveden asetusarvon ollessa suurin mahdollinen automatiikka alkaa kasvattamaan reaktorin pyörimisnopeutta massan sekoittamiseksi ja lämmönsiirtymisen tehostamiseksi. Syöttölaitteen massan lämpötilaa säädetään mittauksen TE02 mukaan muuttamalla moottoriventtiilin TV2 asentoa niin että syötteen lämpötila ei laske alle 0 °C:n.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli suunnitella lämmityslaitteisto Lerkka-biokaasulaitteiston reaktoriin ja syöttölaitteen tarpeisiin. Haasteita työlle asettivat tiedonsaanti biomassan lämmönjohtavuudesta sekä kuiva-ainepitoisuuden ja pyörivän liikkeen vaikutuksesta lämmönsiirtymiseen. Työssä tehtyjen kokeiden ja mittausten tuloksena saatiin selvitettyä, että biomassan kuiva-ainepitoisuudella ja pyörivän liikkeen aiheuttamalla sekoittumisella on vaikutusta lämmönsiirtymiseen. Ripa vaikutuksen hyöty korostuu massan ollessa paikallaan, mutta pyörivän liikkeen aiheuttamalla massan sekoittumisella on huomattavasti tätä suurempi vaikutus. Pyörittäminen vaati taas toisaalta energiaa, eikä jatkuva sekoittaminen ole välttämättä kaasuntuotannon kannalta paras vaihtoehto, joten molemmat asiat on huomioitava laitoksen lämmitystä suunniteltaessa.

Mitoituksen oikea onnistuminen on tämän kaltaisessa laitteistossa tärkeää, koska säiliön umpinaisen rakenteen vuoksi sen sisäpuolelle on erittäin hankalaa ja kallista tehdä muutoksia jälkikäteen. Menoveden lämpötilaa nostamalla ei voida korjata tilannetta, koska liian korkeassa lämpötilassa kaasua tuottavat bakteerit alkavat inhiboida ja kaasun tuotanto vähenee. Liian iso lämmönsiirrin taas tuo lisäkustannuksia ja syö säiliön tilavuutta, jolloin reaktorin kannattavuus kärsii ja takaisinmaksuaika pitenee.

Lämmönsiirtymistä on aina tarkasteltava tapauskohtaisesti tämän kaltaisia laitoksia suunniteltaessa biomassan koostumuksen ja sen sekoittamisen mukaan. Tämän työn perusteella voidaan jatkossa lämmityslaitteistot mitoittaa kohtuullisen tarkasti vastaaviin kohteisiin ja osataan huomioida massakoostumuksen ja liikkeen vaikutus lämmönsiirtoon aiempaa paremmin.

LÄHTEET

1. Biokaasuntuotanto maatilalla. 2/2013. Motiva Oy
Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf. Hakupäivä 29.10.2014.
2. EU:n energiayhteistyö. Työ- ja elinkeinoministeriö 3/2015
Saatavissa: https://www.tem.fi/energia/eu_n_energiayhteistyö Hakupäivä 17.4.2015.
3. Latvala, Markus 2009. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT): Biokaasuntuotanto suomalaisessa toiminta ympäristössä.
Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY_24_2009.pdf?sequence=1. Hakupäivä 28.1.2015.
4. Kaasulaitteiden jälkiasennus. 2015. Biokaasauto.fi
Saatavissa: <http://www.biokaasauto.fi/kaasauto/jalkiasennus>. Hakupäivä 28.1.2015.
5. Kemppainen, Jaakko 2014. Biokaasulla toimiva traktori. Opinnäytetyö. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu, luonnonvara- ja ympäristöala.
6. Piirala, Jukka 2014 BIO JJJJ Oy, toimitusjohtaja Haastattelu 15.11.2014.
7. Grundfoss Ohjeet. 2012. Grundfoss Oy.
Saatavissa: <http://www.kaukora.fi/sites/default/files/kaukorafiles/kayttoohjeet/Grundfosliterature-1191224-1.pdf> Hakupäivä 10.4.2015.

